长江河口动力与风暴潮相互作用研究

张金善^{1,2,3},孔 俊⁴,章卫胜¹,滕 玲¹

(1. 南京水利科学研究院, 江苏 南京 210029; 2. 南京师范大学 地理科学学院, 江苏 南京 210097;
3. 水利部 应对气候变化研究中心, 江苏 南京 210029; 4. 河海大学 海洋与交通学院, 江苏 南京 210098)

摘要:长江口是我国最大的河口,风暴潮是本地区最严重的自然灾害之一.本文分析了本地区风暴潮发生的特点,建立了中尺度气象模式驱动下长江感潮河段河口海岸风暴潮预报数学模型,分析了风暴潮与长江河口动力的相互作用.结果表明,长江河口地区受风暴潮作用特别明显,河口风暴潮最大增水在江阴与徐六泾之间,其位置受上游径流和河口潮汐的影响而摆动;并指出了长江口天文潮、风暴潮与长江洪水作用的一般规律,预测了长江口风暴潮作用下的洪水位.

关 键 词:风暴潮;感潮河段;径流;相互作用;增水;长江口 中图分类号:0353.2 **文献标识码:**A **文章编号:**1009-640X(2008)04-0001-07

Study of interaction between estuary dynamic and storm surge in the Yangtze River

ZHANG Jin-shan^{1,2,3}, KONG Jun⁴, ZHANG Wei-sheng¹, TENG Ling¹

 Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 2. School of Geography Science of Nanjing Normal University, Nanjing 210097, China; 3. Research Center for Climate Change, Ministry of Water Resources, Nanjing 210029, China; 4. School of Communication and Ocean of Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: The Yangtze River estuary is the largest one in China, and the storm surge is regarded as one of the most seriously natural disasters in the estuary. Based on occurrence features, a numerical model, which is driven by mesoscale meteorological model and used for storm surge's forecasting for the Yangtze River tidal reach and estuary, is established. The regularity of interaction between the storm surge and the estuarine dynamics of the Yangtze River is studied. The results indicate that the storm surge have significant influence on the Yangtze River estuary. The maximum water level increase caused by the storm surge can be monitored between Jiangyin and Xuliujing, whose exact position fluctuates owing to the effects of the upstream runoff and estuarine tide. Furthermore the paper reveals the general laws governing the relationships among astronomical tide, storm surge, and flood. It also predicts flood water level under storm surge events.

收稿日期:2008-01-10

基金项目:水利部公益行业科研专项经费项目"气候变化对我国水安全影响及对策研究"(200801001);水利部"948"项目"河口海岸风暴潮和洪水灾害模拟系统的引进"(200705)联合资助;交通部"十一五"专项"风暴潮对港口水陆域航道安全影响研究"(200632800003-03);科技部社会公益研究专项基金项目(2000DIB20096).

作者简介:张金善(1963-),男,江苏赣榆人,教授级高级工程师,主要从事海岸工程泥沙及风暴潮研究.

E-mail: zhang_jinshan@vip. 163. com

Key words: storm surge; tidal reach; runoff; interaction; water level increase; the Yangtze River estuary

我国地处太平洋西海岸,是风暴潮灾害发生频率最高、损失最严重的国家之一.每年进入我国邻海的台风达5次以上,1991~2000年的10年间,风暴潮灾害造成的直接损失平均每年达10亿元人民币以上.因此,预防和抵御台风造成的灾害损失已成为防灾、减灾研究的重要课题.

我国受台风风暴潮影响地区主要为福建、江苏、浙江、沪沿海以及广东、广西和海南沿海地区,江、浙、沪沿海 地区的重灾区集中在长江三角洲地区,而该地区是我国经济最发达的地区,故台风风暴潮引起的损失比较严重.

1 长江口风暴潮发生的一般特点及研究现状[1,2]

影响长江口地区的风暴潮主要由台风引起,寒潮风暴潮相对较少.一般台风经过的时间为1~2d,其主 要成灾发生在风暴潮主振阶段.有两种台风路径造成的增水现象尤应重视.一是台风中心在长江口附近登 陆,并继续向西北方向移动,此种路径的台风约占北上台风的8%左右,增水较大,苏北中、南部沿海增水达 2m以上;另一种是北纬35°左右的台风中心改向东北偏北方向并在朝鲜沿岸登陆,这种路径的台风在江苏 沿岸出现最多,占北上台风的62%左右,增水也较大.

如风暴潮高峰时正和天文大潮相遇,两者潮势叠加使水位暴涨,就会导致特大风暴潮灾害的发生.历史 上影响长江口地区最大风暴潮增水均由于长江口风暴潮与天文潮相遇,如1962年8月(农历7月初3), 1989年8月4日,1996年8月1日(农历8月16日),9711(Winnie农历7月15日)和0216(森拉克,农历 8月初一)等风暴潮都发生在天文大潮期间.因此,天文潮与风暴潮的相互作用,是造成长江口地区特大天文 潮的主要原因.

风暴潮灾害除了受大风和高潮位的影响外,与当地的地形地势有着密切的关系. 江、浙地区地势较低,也 是易成灾的原因. 长江口地区除受台风暴潮影响外,还受长江流域上游洪水的影响. 如长江口洪水、天文大潮 和风暴潮三者相遇,则往往造成严重灾害.

端义宏^[3,4]、周旭波^[5]等建立了长江口地区二维风暴潮数值模式,进行了数值试验,对长江口地区天文 潮与风暴潮的作用机理进行了研究;张长宽^[1-2]等建立了长江江阴到河口段长江口综合实用数学模型,讨论 了风暴潮对河口增水的影响,研究了不同条件下风暴潮的增水特点.张金善等^[6]等利用东中国海风暴潮模 型、长江口风暴潮模型、一维洪水演进模型等多尺度嵌套高精度模型的办法,研究了长江口风暴潮与河口、海 岸的相互作用.应该指出的是,由于动力的复杂性,以上研究模型边界离河口太近,无法准确考虑长江径流与 风暴潮的相互作用,这是目前长江口风暴潮研究的主要缺陷,张金善等^[7]对长江下游感潮河段的径流与天 文潮的相互作品进行了研究,指出其一般规律,本文在此基础上针对这个问题研究风暴潮与长江河口动力的 相互作用.

2 长江下游感潮河段河口海岸与风暴潮作用数学模型

2.1 正交坐标系下长江口感潮河段平面二维风暴潮作用数学模型

长江口地处长江与东海的交汇处,岸线复杂,采用正交曲线坐标系下的运动方程来建立长江河口海岸平 面二维风暴潮模型:

水流连续方程
$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{1}{\sqrt{ar}} \left[\frac{\partial}{\partial \xi} (\sqrt{a} Du) + \frac{\partial}{\partial \eta} (\sqrt{r} Dv) \right] = 0$$
(1)

ξ 方向动量方程

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{u}{\sqrt{r}} \frac{\partial u}{\partial \xi} + \frac{v}{\sqrt{a}} \frac{\partial u}{\partial \eta} - \frac{v^2}{\sqrt{ar}} \frac{\partial \sqrt{a}}{\partial \xi} + \frac{uv}{\sqrt{ar}} \frac{\partial \sqrt{r}}{\partial \eta} = fv - \frac{g}{\sqrt{r}} \frac{\partial \zeta}{\partial \xi} + A_H \left(\frac{1}{\sqrt{r}} \frac{\partial A}{\partial \xi} - \frac{1}{\sqrt{a}} \frac{\partial B}{\partial \eta} \right) - \frac{g\sqrt{u^2 + v^2}}{C^2 D} u - \frac{g\sqrt{u^2$$

$$\frac{1}{\rho\sqrt{r}}\frac{\partial p_a}{\partial\xi} - \frac{1}{\rho D}\left(\frac{1}{\sqrt{r}}\frac{\partial S_{\xi\xi}}{\partial\xi} - \frac{1}{\sqrt{a}}\frac{\partial S_{\xi\eta}}{\partial\eta}\right) + \frac{1}{\rho D}\tau_{s\xi}$$
(2)

η 方向动量方程

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{u}{\sqrt{r}} \frac{\partial v}{\partial \xi} + \frac{v}{\sqrt{a}} \frac{\partial v}{\partial \eta} - \frac{u^2}{\sqrt{ar}} \frac{\partial \sqrt{r}}{\partial \eta} + \frac{uv}{\sqrt{ar}} \frac{\partial \sqrt{a}}{\partial \eta}$$

$$= -fu - \frac{g}{\sqrt{a}} \frac{\partial \zeta}{\partial \eta} + A_H \left(\frac{1}{\sqrt{r}} \frac{\partial B}{\partial \xi} - \frac{1}{\sqrt{a}} \frac{\partial A}{\partial \eta} \right) - \frac{g\sqrt{u^2 + v^2}}{C^2 D} v - \frac{1}{\rho\sqrt{a}} \frac{\partial p_a}{\partial \eta} - \frac{1}{\rho D} \left(\frac{1}{\sqrt{a}} \frac{\partial S_{\eta\eta}}{\partial \eta} - \frac{1}{\sqrt{r}} \frac{\partial S_{\eta\xi}}{\partial \xi} \right) + \frac{1}{\rho D} \tau_{s\eta} \quad (3)$$

式中:u,v分别表示沿 ξ,η 方向的流速分量; $D=h+\zeta$ 为总水深;风应力 $\tau_{s\xi} = \rho_a c_D w_{\xi} \sqrt{w_{\xi}^2 + w_{\eta}^2}; \tau_{s\eta} = \rho_a c_D w_{\eta}$ $\sqrt{w_{\xi}^2 + w_{\eta}^2} (w_{\xi}, w_{\eta} 分 别 为 曲 线 坐 标 系 下 <math>\xi, \eta$ 方 向 风速, m/s); $A = \frac{1}{\sqrt{ar}} \left[\frac{\partial}{\partial \xi} (\sqrt{au}) + \frac{\partial}{\partial \eta} (\sqrt{rv}) \right]; B = 1$

 $\frac{1}{\sqrt{ar}} \left[\frac{\partial}{\partial \xi} (\sqrt{av}) - \frac{\partial}{\partial \eta} (\sqrt{ru}) \right]; a = x_{\eta}^{2} + y_{\eta}^{2}; r = x_{\xi}^{2} + y_{\xi}^{2}; f = 2\omega \sin\varphi$ 为科氏力系数(ω 为地球自转角速度); h 为 基面以下水深; ζ 为水位; A_{h} 为水平涡粘扩散系数; C 为谢才系数; g 为重力加速度; ρ_{a} 为大气压. 模式含有风 应力、气压梯度力和底摩擦力、科氏力的潮汐动力模拟系统,具有模拟水流、潮汐、风暴潮运动以及波浪与水 流作用的能力.

数学模型的上(西)边界取在长江感潮河段潮区界-大通,下(东)边界取在东经123°,北边界取在辐射 沙洲的南翼-启东吕泗一线;南边界取在象山湾以南.长江河口风暴潮计算网格采用曲线拟合正交网格,空 间步长约500 m,最小网格200 m,模型计算网格见图1.



图 1 长江下游感潮河段河口海岸平面二维风暴潮模型网格图

Fig. 1 Mesh diagram of 2D horizontal storm surge model for the Yangtze River tidal reach and estuary

模型外边界由东中国海模型提供^[8],河口上游边界条件由上游大通流量和水位共同确定.风暴潮风场条件采用的是中尺度台风模式驱动^[9-11].

2.2 模型验证及率定

为了保证模型的相似性,对感潮河段及河口地区,洪季、枯季大通、芜湖、南京、江阴、天生港、徐六泾、吴 淞等站天文潮进行了验证.图2~3分别为部分站位的洪季、枯季的潮波验证过程.结果表明模型参数选择合 理,计算的潮波传播与实际情形一致,具有较好的相似性.图4为代表性的6站潮位验证图.













Fig. 4 Tidal wave verification of astronomical tide near the Yangtze River estuary

模型对长江口附近潮波的验证选取的是9711 风暴潮发生时同步的天文潮资料,资料的来源为调和分析预报的潮位,在通常条件下也有足够的精度.模型对长江口附近天生港、白茆、石洞口、长兴、吴淞、横沙及口外中浚、九段沙东和杭州湾的芦潮港、滩浒、大戢山及陈山岛等共12站的潮位进行了验证.从验证结果看,大范围内相位误差小于10 min,潮差误差及潮位平均误差均小于0.15 m,说明本模式在大范围的潮汐计算中能很好地模拟计算区域从外海到河口的潮波运动规律.

2.3 风暴潮增减水验证

目前,通常将实测的潮位减去天文潮潮位作为风暴潮增水值.由于风暴潮与天文潮作用是非线性的,所 以增水也是非线性的.因此,该方法不是很合理,但目前尚没有更准确的方法,本文仍然采用此方法,首先计 算天文潮时的潮流、潮位,然后计算风暴潮条件下的潮流、潮位,最后计算增水值.为了验证风暴潮的增水,在 长江下游选取了从南通的天生港到长江口附近和杭州湾等共16个测站的风暴潮增水资料进行验证.图5给 出了部分测站100多小时的风暴潮增水过程比较.





从图 5 可见,最大增水误差较小(小于 0.20 m);最大增水发生的时刻与预报的时刻小于 0.5 h,除吴淞 站增水曲线差异较大(最大增水值相近)外,其余站均达到了较高的模拟精度.此外,从增水过程看,此次风 暴潮预测利用中尺度气象模型模拟风场驱动下的风暴潮计算结果,较好地模拟了此次风暴潮的发生过程,主 要测站不但较好地模拟了风暴潮的主振,还较好地模拟了初振和余振.

从上述模拟结果看,本文所建立的感潮河段河口海岸风暴潮数学模型较好地模拟预测了 9711(Winnie) 风暴潮的发展过程,可用来预报长江口地区的风暴潮运动.

3 长江感潮河段径流与河口海岸风暴潮作用分析

根据长江上游多年来流统计,一般少水年(枯)水流量17 000 m³/s,平均中水流量为45 500 m³/s,近年 特大洪水流量为82 300 m³/s(1998 洪水流量,1954 年流量虽然更大,但与现在边界条件差异较大,故仍选用 1998 年的洪季最大流量作为特大洪水流量).本文以上述3 种流量为代表流量研究径流与风暴潮的作用.

3.1 不同流量下长江感潮河段水位分布

三种来流条件下长江下游高水位的沿程分布见图 6,从水位分布看,若不考虑台风影响,在径、潮相互作用下,最高水位沿程逐渐下降;随着上游流量的增大,沿程各站最高水位有所增高,流量为 82 300 m³/s 时,大通站的最高水位相比流量为 45 500 m³/s 时增加约 5 m,相比流量为 17 000 m³/s 时,增加约 10 m;至口门附近吴淞站,不同流量下的最高水位已比较接近.





长江下游吴淞以上的高水位取决于上游的来流量,离口门距离越远,上游来流量对水位的影响越大;江 阴以上属径流对高水位影响较大区段,但潮汐作用不可忽视;江阴以下径流对水位的影响逐渐减小,从吴淞 口向外海,高水位主要受外海潮汐控制.

同时,从图6中也不难看出,中浚至大通站间,不同流量的坡降差异比较明显,流量越大坡降越大,而江 阴站以下,坡降比较接近,也从一定意义上说明了江阴站以上径流效应较潮流效应更强,江阴站以下则潮流 效应更为明显.

3.2 不同流量条件下,9711 风暴潮对长江下游高水位及增水的影响

长江洪水位受到上游径流和下游潮流的作用,在正常条件下(通常天文潮),吴淞以上径流越大,水位越高,江阴以上则更加明显.在风暴潮作用下,流量越大,风暴潮的水位越高,三级流量相比,则 82 300 m³/s流量下,水位最高(见图 7).从水位的影响程度看,上游流量小,水位增幅大,与无台风影响相比,台风引起的水位增幅以17 000 m³/s时为最大,82 300 m³/s时最小.这反映了河口动力与径流的相互作用,上游径流动力减弱时,河口动力对上游的作用会加强;反之,则减弱.从沿程最高潮位对应的增水可以看出,从大通站至口外中浚站,基本呈现先增大后减小的趋势,江阴站以下增幅逐渐减小的趋势最为明显.三种流量条件下,江阴至长江口的增水与上游差别很大,增水差异主要位于吴淞与江阴之间,从下游至江阴差异逐渐增大.体现了风暴潮对长江口沿程作用的不均匀性.



图 7 上游不同来流条件下,9711风暴潮引起下游各站增水分布



4 结 语

本文总结分析了长江口地区风暴潮发生的规律和特征,重点研究了长江感潮河段风暴潮与河口径流的 相互作用规律,建立了长江感潮河段河口海岸风暴潮的作用数学模型,并对模型进行了较全面的验证和率 定.研究表明,在风暴潮作用下,长江感潮河段最大增水区位于江阴至徐六泾之间,最大增水位置受上游径流 和天文潮的综合作用决定.径流减小时,最大增水区上移;潮汐动力减弱时,最大增水区下移.特大洪水条件 下,整体水位有所增高,但风暴潮造成的增水不明显.

参考文 献:

- [1] 张长宽,谭 亚,王 震,等.长江下游江阴以下河段洪水和风暴潮综合实用数学模型[R].南京:河海大学,2004.
- [2] 张金善. 长江河口动力与台风风暴潮相互作用研究[D]. 南京: 南京师范大学, 2008.
- [3] 端义宏,朱建荣,秦曾灏,等.一个高分辨率的长江口台风暴潮数值预报模式及其应用[J].海洋学报,2005,27(3): 11-19.
- [4] 端义宏,秦曾灏.上海沿岸天文潮与风暴潮非线性相互作用数值研究[J].海洋与湖沼,1997,28(1):80-87.
- [5] 周旭波,孙文心. 长江口以外海域风暴潮与天文潮的非线性相互作用[J]. 青岛海洋大学学报,2000,30(2):201-206.
- [6] 张金善,钟 中,马进荣,等.强热带风暴引起的暴潮模拟和灾害分析评估[R].南京:南京水利科学研究院,2004.
- [7] 张金善,孔 俊,章卫胜. 长江感潮河段径流支河口海岸动力作用机制的数值模拟[C]//《水动力学研究与进展》编委 会,第二十一届全国水动力学研讨会论文集. 北京:海洋出版社,2008.
- [8] 林 珲, 闾国年, 宋志尧. 东中国海潮波系统与海岸演变模拟研究[M]. 北京: 科学出版社, 2000: 84-113.
- [9] 张金善, 钟 中, 黄 瑾. 中尺度大气模式 MM5 简介[J]. 海洋预报, 2005, 22(1): 31-40.
- [10] 钟 中,张金善,黄 瑾. 模式在热带气旋模拟中的应用[J]. 海洋预报, 2004, 21(4): 10-15.
- [11] 张金善,钟 中,胡轶佳. 热带气旋风暴潮模拟中的海面风场特征对比研究[J]. 水动力学研究与进展(A辑),2008, 23(6):687-693.